



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PRUŽNÉ ULOŽENÍ KOMPRESORU NA RÁMU

COMPRESSOR ELASTIC MOUNTING ON FRAME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Vít Novák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pružné uložení kompresoru na rámu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout pružné uložení nového typu kompresoru na rámu.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat teorii a návrh měření dle platných norem a literatury.
Navrhnout uspořádání měření (zapojení kompresoru, vhodné umístění snímačů).
Realizovat měření – předběžně cca čtyři různé otáčky a čtyři výstupní tlaky a jejich kombinace.
Vyhodnotit naměřená data a navrhnout změny umístění a typu silentbloků.
Navržené úpravy ověřit měřením.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

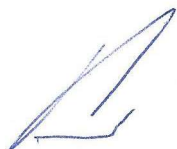
KÖEHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

HAFNER, Karl Ernst a MAASS, Harald. Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschinen. Wien, New York: Springer Verlag, 1995. 424 s. ISBN 978-3-7091-7468-5.

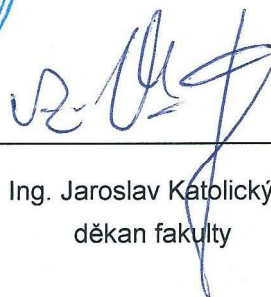
SKOTSKY, Alexander A. Automotive engines: control, estimation, statistical detection. Berlin: Springer Verlag, 2009. 215 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 1. 11. 2017



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce řeší eliminaci vibrací pístového kompresoru pomocí pryžových silentbloků. Dále se jedná o metodiku měření vibrací pístových kompresorů ve firmě Sauer Žandov, a.s. Práce obsahuje návrh uložení, měření vibrací a zpracováním v časovém spektru, analýzou ve frekvenční oblasti a celkovými hodnotami vibrací. Použité nástroje a doporučená nastavení jsou přiblížena pro měření vibrací. Podařilo se naleznout optimální řešení pro nasazení kompresoru u koncových zákazníků a prokázaly se kvality moderních měřicích metod. Firma Sauer Žandov, a.s. postupně přechází na měření vibrací dle této práce – metodiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pístový kompresor, měření, vibrace, FFT

ABSTRACT

This thesis solves vibrations elimination of piston compressor by using elastic bushings. Further this is a methodology of mechanical vibrations measurement of piston compressors in company Sauer Žandov, a.s. Thesis contains mounting design, vibrations measurement and processing in time spectre, frequency analysis and overall values of vibrations. Used tools and recommended settings are explained for vibrations measurement. Its succeed to find optimal solution for finally deployment by clients and it demonstrated quality of new measuring methods. Company Sauer Žandov, a.s. fluently passes on vibrations measurement by this thesis – methodology.

KEYWORDS

Piston compressor, measurement, vibrations, FFT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, V. *Pružné uložení kompresoru na rámu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Václav Píštěk.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Vít Novák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své rodině za stálou podporu v průběhu celého studia. Dále děkuji kolegům ze Sauer Žandov, a.s. za téma bakalářské práce, výbornou spolupráci a zapůjčení všech potřebných materiálů a vybavení.

OBSAH

Úvod	9
1 Vibrace.....	10
1.1 Vlivy vzniku vibrací kompresoru	10
1.2 Základní pojmy kmitání.....	10
1.3 Kritéria hodnocení vibrací	11
2 Teorie a zpracování měření	14
2.1 Hardware.....	14
2.2 Softwarové nástroje	17
3 Návrh uložení kompresoru	20
3.1 6 x 65 Sh	20
3.2 8 x 40 Sh	21
3.3 8 x 65 Sh	21
4 Měření.....	22
4.1 Informace o měření	22
4.2 Hodnocení měření.....	24
Závěr.....	25
Seznam použitých zkratk a symbolů	27
Seznam příloh.....	28

ÚVOD

Předmětem bakalářské práce je navrhnout uchycení kompresoru na rámu pomocí pružných pryžových silentbloků s cílem eliminovat vibrace produkované strojem a zajistit tak klidný a spolehlivý chod kompresoru. Navržená uchycení se ověří měřením pomocí soustavy akcelerometrů. Tento typ kompresoru může být provozován až ve čtyřech otáčkových režimech na základě požadavků zákazníka. Při koncové instalaci kompresoru již však pracuje pouze v jednom režimu, a je tedy nutné měřením ověřit všechny možnosti uchycení a vybrat jednu nebo více nejlepších variant uchycení.

1 VIBRACE

Vibrace, také je možné se setkat s označením kmitání, oscilace, chvění apod., vždy značí totéž. Jedná se o vratný pohyb opakující se v čase. Tato práce se věnuje vibračním stroje jako celku. V této kapitole budou přiblíženy základní pojmy a veličiny důležité pro měření vibrací.

1.1 VLIVY VZNIKU VIBRACÍ KOMPRESORU

Pístový kompresor je strojní zařízení určené ke stlačování plynů, nejčastěji vzduchu.

Je založen na klikovém mechanismu, obdobně jako spalovací pístové motory, avšak je hnán jiným motorem, nejčastěji elektromotorem. Tato práce se konkrétně zabývá vibracemi vzniklými na třístupňovém čtyřválcovém vzduchem chlazeném kompresoru s uspořádáním válců do W. Všechny ojnice jsou uchyceny na společném ojnicním čepu. Kliková hřídel je tedy velmi robustní s dlouhým ojnicním čepem. Během jedné otáčky dojde ke všem stupňům stlačení plynu za sebou v krátkém časovém intervalu. K prvnímu stupni stlačení dochází dvakrát, jedná se vždy o první a poslední válec.

Z konstrukčního uspořádání kompresoru jasně plyne, že provoz stroje bude velmi hrubý a vzniknou silné vibrace zejména v osách Y a Z. Ovšem provoz kompresoru není oproštěn od vibrací v ose X, které jsou majoritně důsledkem kombinace kmitání v rovině YZ, buzení v přední části, klidné zadní části s elektromotorem a pružnému uložení na silentblocích. Ze zanedbatelné části jsou tvořeny tlakovými rázy v potrubí

Z předchozího odstavce plyne, že vibrování kompresoru je komplexní prostorový pohyb. Měřením v jednotlivých osách je možné získat velmi přesná čísla, jednotlivé pohyby od sebe oddělit a podrobit je důkladné analýze.

1.1 ZÁKLADNÍ POJMY KMITÁNÍ

1.1.1 KMIT

Kmitem je nazýván pohyb tělesa z výchozí polohy do krajní a zpět. V případě pístového kompresoru je výchozí poloha v klidu ve středu mezi dvěma krajními polohami. Za běhu kompresor výchozí polohou prochází, návrat nastává v krajních polohách.

1.1.2 PERIODA

Též doba kmitu T [s] je určena časem, při kterém se těleso vrátí do výchozí polohy, případně na sinusoidě mezi dvěma sousedícími maximálními kladnými výchylkami. Vibrace u kompresoru jsou úzce spjaté s otáčkami stroje. Jedná se tedy i o dobu jedné otáčky klikového hřídele.

1.1.3 FREKVENCE

Perioda udává i frekvenci (kmitočety) f [Hz] kmitání a úhlovou frekvenci ω [s^{-1}]. Vztah mezi těmito veličinami je dán rovnicí:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1)$$

1.1.4 AMPLITUDA, OKAMŽITÁ VÝCHYLKA

Amplituda y_m [m] je maximální hodnota výchylky. Na základě znalostí amplitudy a běžícího času t [s], je možné vyjádřit okamžitou výchylku y [m] pomocí rovnice harmonického kmitání:

$$y = y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Kde φ je počáteční fáze celý výraz $(\omega t + \varphi)$ je fáze.

Aplikuje-li se tato rovnice na vibrace kompresoru, je možné u jednoduchých vibrací (blíží se průběhem dokonalé sinusoidě) zjistit okamžitou výchylku kompresoru a jedná se tedy o harmonické kmitání. Ovšem většina případů je příkladem anharmonického kmitání, stále však periodicky opakující se ho.

1.2 KRITÉRIA HODNOCENÍ VIBRACÍ

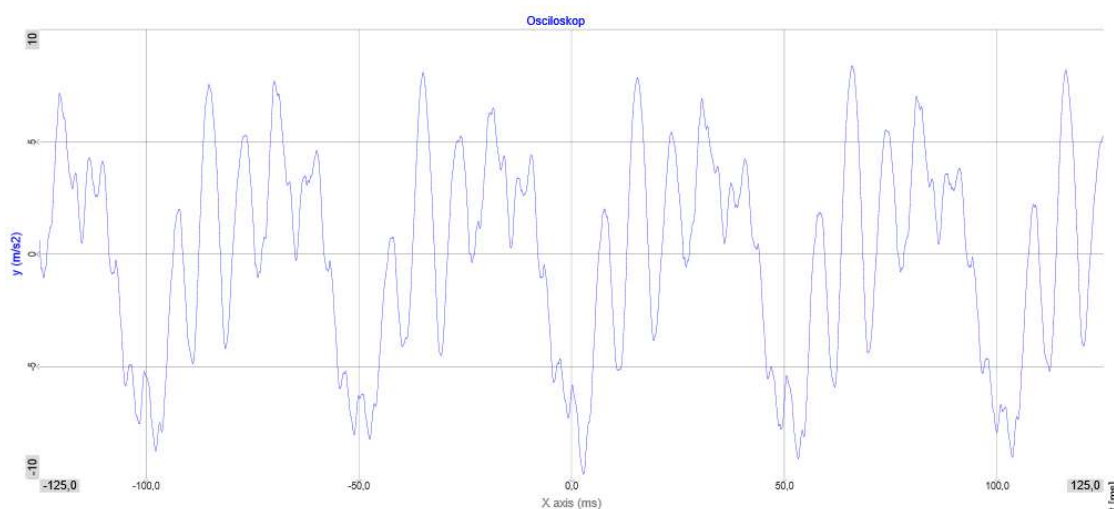
V této kapitole budou přiblížena a vysvětlena kritéria hodnocení vibrací pomocí slovního popisu a základní matematiky. Těmito kritérii jsou výchylka vibrací [mm], rychlost vibrací [mm/s] a zrychlení vibrací [m/s^2]. Dle normy ČSN ISO 10816-8 [1] musí být maximální hodnoty daných veličin uváděny v efektivní hodnotě RMS.

Zároveň je však nutné brát v potaz i špičkové hodnoty (Peak), zejm. u zrychlení, které mohou značit další problémy s provozem stroje. Nejčastěji klepání, které se vyznačuje vysokými špičkovými hodnotami zrychlení spolu s malou výchylkou a rychlostí. Stejně tak je nutné porovnávat RMS hodnoty zrychlení, rychlosti i výchylky s rozložením ve frekvenčním spektru a jejich průběhem v čase.

1.2.1 ZRYCHLENÍ

Vektorová veličina charakterizující změnu rychlosti v čase. Nejčastěji přímo měřená veličina pomocí akcelerometrů v jednotlivých osách. Zrychlení vibrací se posuzuje v základní jednotce $[m/s^2]$.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} = -\omega^2\vec{s} = i\omega\vec{v} \quad (3)$$

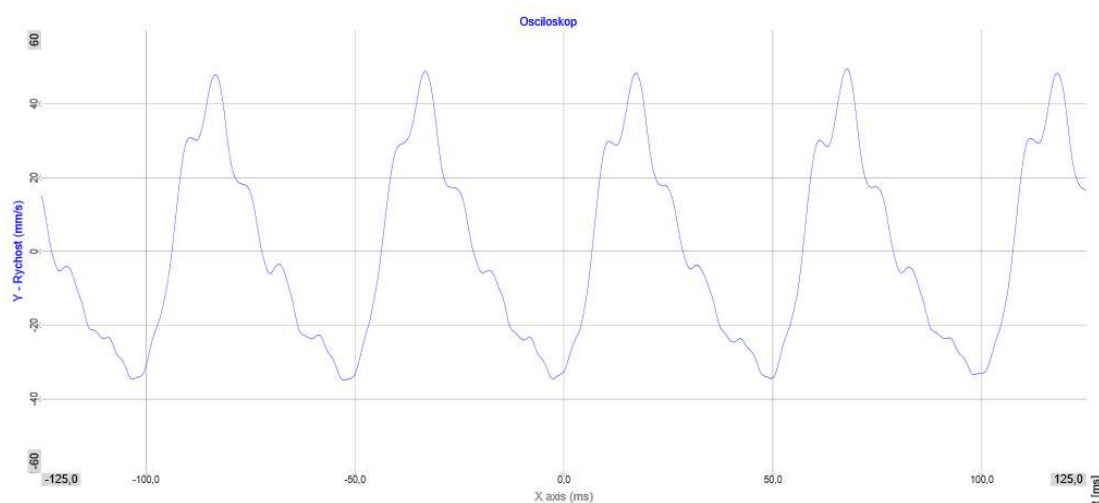


Obr. 1 Průběh zrychlení vibrací kompresoru, 1180 ot/min.

1.2.2 RYCHLOST

Vektorová veličina udávající změnu výchylky v čase. Dopočítává se v reálném čase integrací ze zrychlení. Posuzováno v jednotce $[mm/s]$.

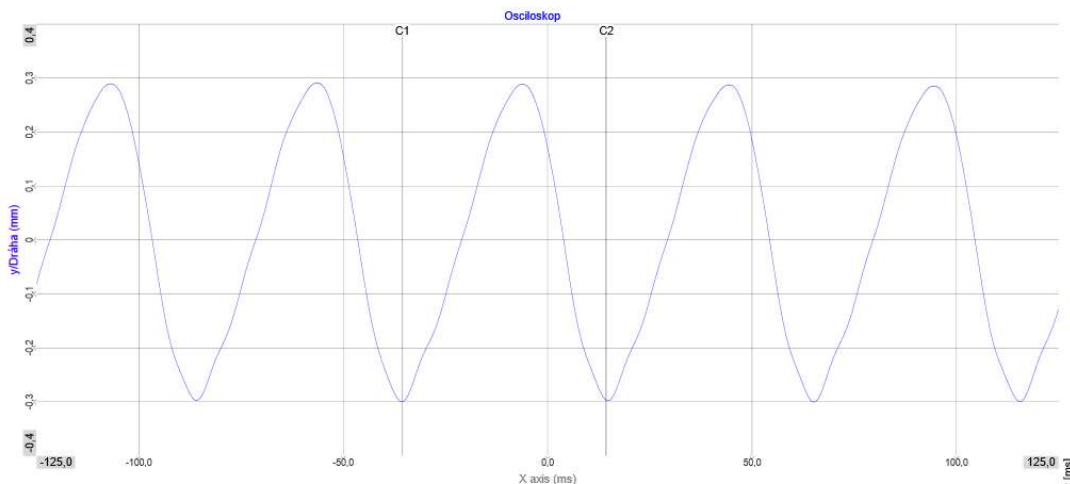
$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} = \int \vec{a} dt = i\omega\vec{s} = -\frac{i}{\omega}\vec{a} \quad (4)$$



Obr. 2 Průběh rychlosti vibrací kompresoru, 1180 ot/min.

1.2.3 VÝCHYLKA

Značí vzdálenost krajních poloh od klidové. Zřídka používané pro charakteristiku vibrací. V reálném čase dopočítáno dvojitou integrací ze zrychlení. Uváděno v [mm].



Obr. 3 Průběh výchylky vibrací kompresoru, 1180 ot/min.

$$\vec{s} = \int \vec{v} dt = \iint (\vec{a} dt) dt = -\frac{i}{\omega} \vec{v} = -\frac{1}{\omega^2} \vec{a} \quad (5)$$

Rovnice (3), (4), (5) převzaty z ČSN ISO 10816-8 [1] a upraveny.

2 TEORIE A ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola je rozdělena do dvou hlavních částí. První se zabývá přístroji a potřebným hardwarem k realizaci měření a sběru dat. Druhá zpracováním získaných dat příslušným softwarem a nástroji za získkem nejvěrohodnějších výsledku pro hodnocení vibrací

2.1 HARDWARE

V této kapitole je přiblíženo potřebné hardwarové vybavení pro měření vibrací.

2.1.1 AKCELEROMETRY

Akcelerometr je snímač zrychlení. Snímače se různí použitou technologií (piezoelektrické, piezorezistivní, kapacitní atd.), princip fungování zůstává velmi podobný, liší se výstupem ze snímače. Popis funkce bude vysvětlen na piezoelektrických akcelerometrech. Ty byly použity při měření vibrací kompresoru v této práci. Konkrétně jde o tři snímače firmy Metra Mess- und Frequenztechnik (MMF), typ KS 76C-100 (viz. obrázek 4)

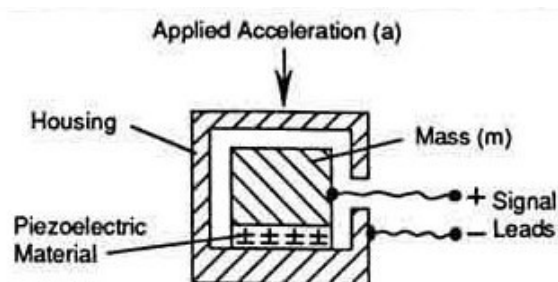


Obr. 4 Snímače KS 76C-100 umístěné na podstavci elektromotoru.

Dle druhého Newtonova zákona je síla \vec{F} [N] přímo úměrná zrychlení:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (6)$$

Ve snímači je seismická hmota, která tlačí silou přímo úměrnou zrychlení do piezoelektrického materiálu, na kterém se vytvoří náboj úměrný velikosti působící síly. Výstupem snímače je napětí přímo úměrné zrychlení, též nazýváno sensitivita. U typu KS 76C-100 to je 100 mV/g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Na obrázku č. 5 je funkce znázorněna graficky.



Obr. 5 Grafické znázornění funkce piezoelektrického akcelometru. [4]

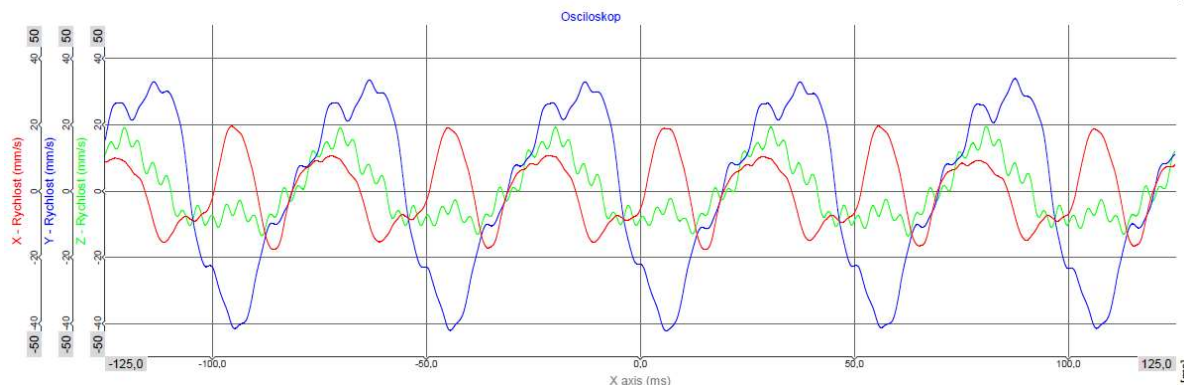
2.1.2 DATALOGGER

Zařízení umístěné během měření mezi akcelerometry a počítačem. Slouží zejména jako A/D převodník. Výstup snímačů transformuje do digitální informace, se kterou je dále schopen pracovat software. Většinou obsahuje více vstupů a je možné zapojit více snímačů (akcelerometry, tlaková čidla, optická čidla apod.). Výhodou je synchronizace sbíraných dat v čase a možnosti pokročilé diagnostiky stroje. Výstup z dataloggeru do PC je proveden běžným rozhraním USB.



Obr. 6 Dataloger DEWESoft SIRIUS s připojenými akcelerometry KS 76C-100.

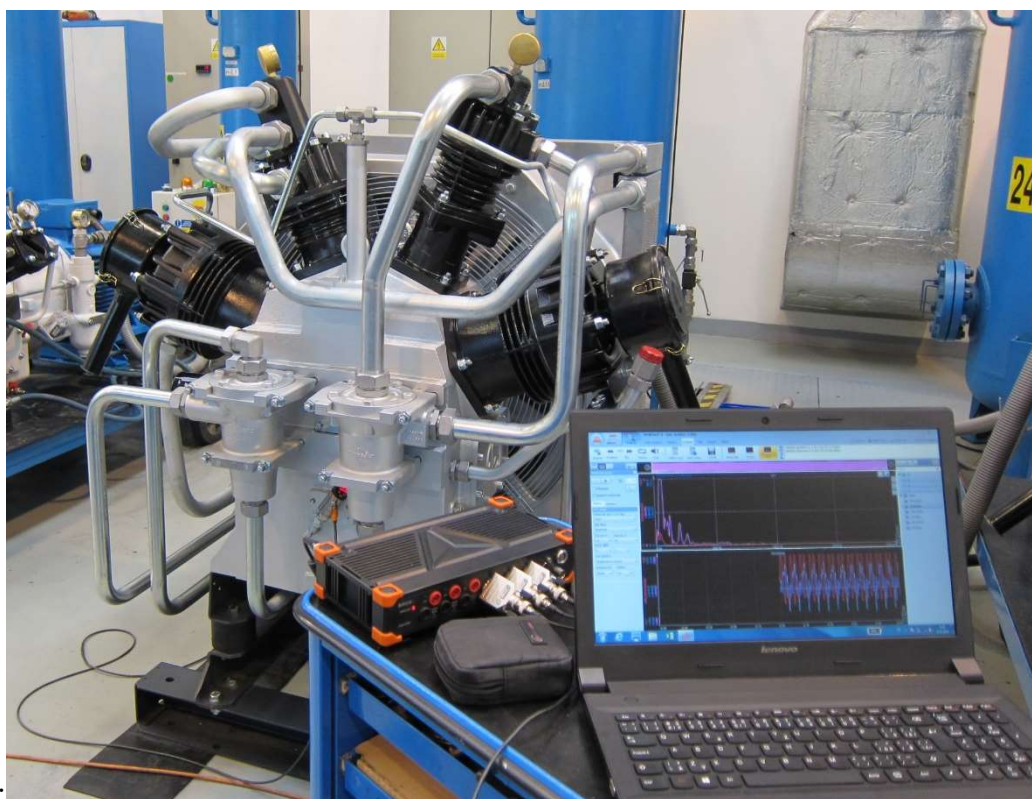
V případě této práce byly v dataloggeru DEWESoft SIRIUS zapojeny tři akcelerometry KS 76C-100. Toto řešení zásadně zrychlí fyzické měření a při následné analýze dat umožní lépe porozumět vibracím ve všech osách kompresoru. Na obrázku č. 7 je vidět záznam rychlosti vibrací současně ve třech osách.



Obr. 7 Průběh rychlosti vibrací v osách X, Y, Z, 1180 ot/min

2.1.3 POČÍTAČ

Měřicí soustavu hardwarově dotváří počítač. Pro základná měření s menším počtem vstupů postačí i méně výkonné počítače. Je-li nutné sledovaná data během měření matematicky zpracovávat nebo je připojeno více snímačů pracujících zároveň, je velmi vhodný výkonný počítač. Takováto měření jsou již náročná na procesor a operační paměť. Není-li k dispozici výkonný počítač, je možné veškeré zpracování dat provést zpětně až po měření.



Obr. 8 Měřicí aparatura s kompresorem.

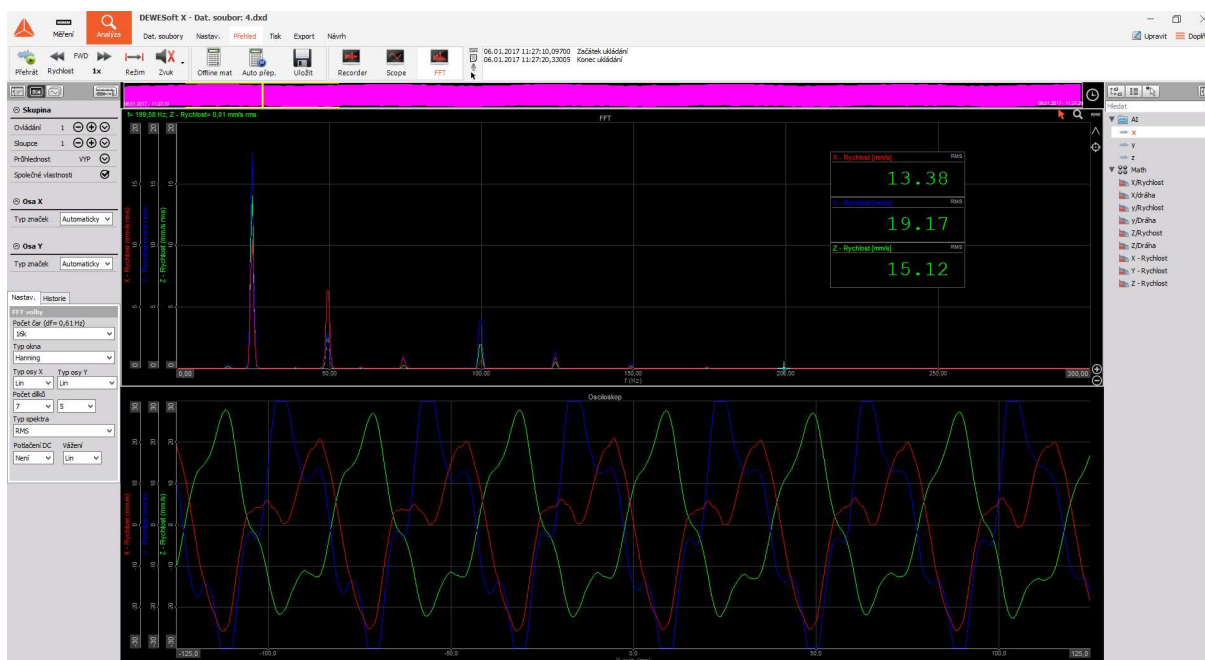
2.2 SOFTWAREVÉ NÁSTROJE

V dnešní době je nutné věnovat stejně velkou pozornost volbě vhodného softwaru. Je nutné, aby byl schopen využít potenciál ukrývající se v celém měřicím zařízení a poskytnout všechny potřebné nástroje pro zpracování získaného signálu.

V této kapitole bude uvedeno a přiblíženo nastavení a postproces pro měření vibrací.

2.2.1 SOFTWARE

Pro měření a zpracování dat byl použit software DEWESoft. Konkrétně měření za pomoci DEWESoft X2 a zpracování dat v novější verzi DEWESoft X3. Rozdíly mezi verzemi nemají vliv na výsledky.



Obr. 9 Pracovní prostředí programu DEWESoft X3

Kompletní řešení od firmy DEWESoft bylo vybráno na základě kompatibility dataloggeru a softwaru, přívětivosti uživatelského prostředí a širokým množstvím možností měření a zpracování dat. Obdobných kvalit dosahují systémy i od jiných výrobců, stejně tak se v nich dají provést i následné operace.

2.2.2 VZORKOVÁNÍ

Rozumí se jím počet vzorků, které jsou odebrány. Spojitý signál je možné do nekonečna zvětšovat, ovšem limity výpočetní techniky jsou jasně dané – nedisponují neomezenou pamětí ani výpočetním výkonem. V praxi při záznamu signálu je nutné horizontální časovou osu rozdělit na konečný počet úseků, jejichž hodnoty jsou zaznamenány a uloženy.

Rychlost vzorkování udává počet vzorků za sekundu (s^{-1}), někdy též vzorkovací frekvence f_v (Hz). Dle Shannonova teorému je nutné, aby vzorkovací frekvence f_v byla alespoň dvakrát vyšší než nejvyšší možné frekvence snímaného signálu f_s .

$$f_v > 2f_{s,max} \quad (7)$$

V této práci byla zvolena vzorkovací frekvence $f_v = 20$ kHz. Hodnota je mnohonásobně vyšší, než by bylo třeba pro vibrace kompresoru, avšak některá získaná měření byla použita i za jinými účely, než je tato práce. Z toho důvodu je vzorkovací frekvence takto vysoká.

2.2.3 FREKVENČNÍ ROZSAH

Frekvenční rozsah snímače musí spolehlivě pokrýt pásmo, ve kterém bude stroj vibrace produkovat. Jelikož jsou vibrace kompresoru poměrně nízkofrekvenční (cca. od 16 Hz do 200 Hz), naprostá většina dostupných akcelerometrů je schopná je měřit. U modelu KS 76C-100 je frekvenční rozsah 0,13 – 24 000 Hz.

2.2.4 INTEGRACE

Jak je uvedeno v kapitole 1.3.2 a 1.3.3 rychlost a výchylka je získána integrací, případně dvojitou integrací zrychlení podle času. Konkrétní vyjádření v rovnicích (4) a (5).

Integraci je možné provést ještě před samotným měřením při nastavení snímačů nebo následně při zpracování naměřených dat. Nejedná se o složitý úkon, avšak dokazuje, že rostou nároky na znalosti technika, který bude měření realizovat, aby byl schopný dosáhnout relevantních výsledků.

2.2.5 FFT

Zkratka FFT vyjadřuje Fast Fourier Transformation, jejím výsledkem je rozložení obecného periodického signálu do frekvenční oblasti. Výpočet FFT je založen na statistické Fourierově transformaci signálu - signál je nahrazen součtem sinusoid o různé amplitudě, fázi a frekvenci. Z mnoha hledisek je to velmi výhodné, dovoluje hodnotit velmi složitý signál obsahující velké množství šumu, odhalovat harmonické a vlastní frekvence, rezonance a podobně. Není ale možné se pouze spoléhat na FFT a vždy je potřeba pečlivě zkoumat i časový záznam signálu.

POČET ČAR FFT

Počet čar určuje délku časového vzorku, ze kterého je FFT počítáno za předpokladu, že se nemění frekvenční rozsah. Vychází ze vztahu:

$$T_s = \frac{2 \cdot N_s}{f_{max}} \quad (8)$$

Kde T_s [s] doba sběru dat jednoho měření, N_s [-] počet čar FFT, f_{max} [Hz] frekvenční rozsah.

ROZLIŠENÍ FREKVENČNÍHO SPEKTRA

Z volby frekvenčního rozsahu a počtu čar je zároveň definováno rozlišení frekvenčního spektra, někdy též frekvenčního kroku spektra.

$$d_f = \frac{f_{max}/2}{N_s} \quad (9)$$

PRŮMĚROVÁNÍ

V metrologické praxi je průměrování běžné pro zpřesnění výsledků, a ne jinak je tomu i u FFT. Dle způsobu vyhodnocení výsledků se liší lineární a exponenciální průměrování u FFT.

Lineární průměrování přiděluje každé hodnotě stejnou váhu a po dosažení požadovaného počtu průměrů se ukončí. Exponenciální průměrování neustále bere nové hodnoty do průměru. Poslední zaznamenané mají největší váhu a po nasbírání potřebného počtu vzorků staré smaže a vzniká tak místo pro nové. Počet průměrů se liší podle složitosti signálu. Je-li jednoduchý, postačí menší počet průměrů. Se složitostí signálu nutný počet průměrů roste.

Pro potřeby měření vibrací bylo vybráno exponenciální průměrování s 10 průměry.

VÁHOVÁ OKNA A PŘEKRYTÍ

Obsahuje-li časový vzorek celočíselný násobek periody signálu, zobrazí se ve spektru jednou dominantní špičkou. Pokud je násobek neceločíselný, rozprostře se do více špiček. Ve většině případů se nejedná o signál s výraznou frekvencí, a proto je obtížné naladit délku časového vzorku na stejnou periodu. Z toho důvodu se používají váhová okna. Jde o umělou deformaci signálu, aby jednotlivé vzorky na sebe plynule navazovaly.

Jelikož dochází k umělé deformaci signálu, je nutné tuto deformaci kompenzovat. Tím, že se částečně překryjí, dojde k eliminaci deformace signálu.

Na základě doporučení bylo pro potřeby této práce použito váhové okno Hanning, kdy je signál amplitudově modulován časovým průběhem okna. Překrytí 66,7 %.

Tab. 1 Nastavení analyzátorů použitých v této práci.

Analyzátor	Veličina	Vzorkování	Filtr	Váhové okno	df	Průměrování
Overall	v (m/s)	20 kHz	0,01 - 1 kHz	-	-	Slow (3s), RMS
FFT	v (m/s)	20 kHz	0,01 - 1 kHz	Hanning	0,625 Hz	10/exp., RMS

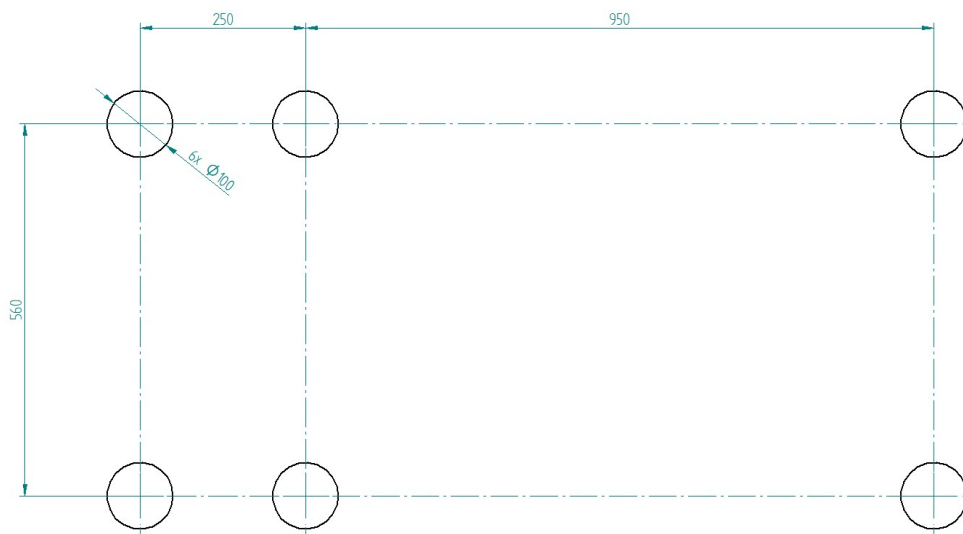
3 NÁVRH ULOŽENÍ KOMPRESORU

Návrh spočívá ve výběru a rozmístění vhodných silentbloků mezi kompresor a nosný rám, na kterém soustava kompresor-elektromotor stojí. Nosný rám a pomocný rám pod elektromotorem jsou součástí uceleného konstrukčního návrhu kompresoru. Je tomu tak z důvodu finální instalace kompresoru do boxu s veškerým příslušenstvím, a musí být zajištěno, že se vše do boxu naistaluje.

Z výše uvedeného plyne, že jediné, čím lze eliminovat vibrace bez velkých zásahů do konstrukce rámu nebo kompresoru, je vhodná volba a umístění silentbloků. Ty jsou vybrány z již používaných modelů u jiných kompresorů. Pro daný kompresor WP463L byly zvoleny tvrdosti silentbloků 40 Sh a 65 Sh. Rozměry silentbloků jsou shodné (pryžové válce s ocelovými podstavami se závitovou tyčí, $D = 100$ mm, $h = 75$ mm). Dále budou uvedeny tři varianty rozmístění silentbloků a jejich tvrdosti.

3.1 6 x 65 SH

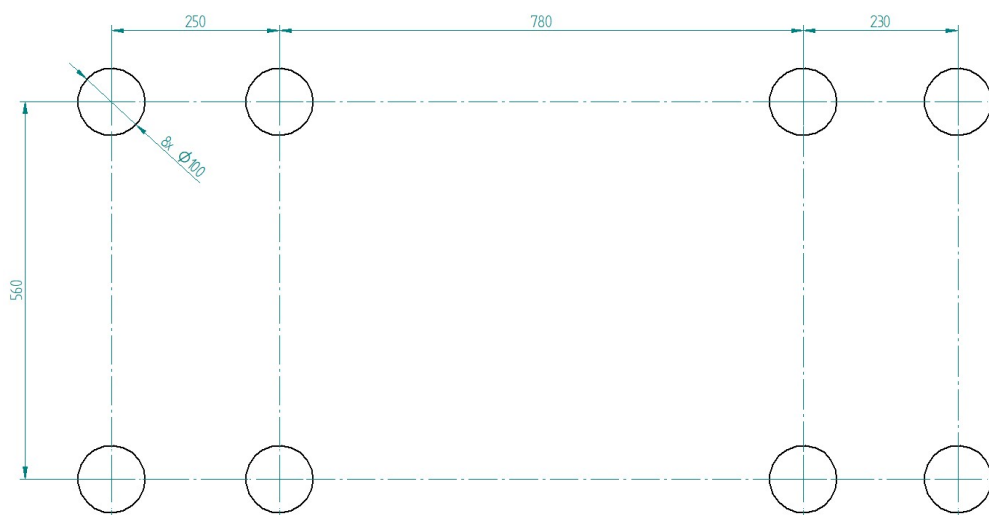
Sestava je na rámu připevněna pomocí šesti silentbloků o tvrdosti 65 Sh. Čtyři silentbloky jsou pod kompresorem (dva na každé straně, rozestup 250 mm) a dva pod elektromotorem (po jednom na každé straně). Podrobný náčrtek na obrázku č.10.



Obr. 10 Rozměrový náčrtek varianty se šesti silentbloky.

3.2 8 x 40 SH

Oproti předchozímu návrhu je zde použito osm silentbloků o menší tvrdosti 40 Sh. Varianta s šesti silentbloky menší tvrdosti není možná, neboť hmotnost kompresoru s elektromotorem je příliš velká. Silentbloky by se bortily a netlumili vibrace optimálně. Náskres uspořádání s rozměry na obrázku č. 11.



Obr. 11 Rozměrový náskres varianty s osmi silentbloky.

3.3 8 x 65 SH

Rozměrově je tato varianta shodná s předchozí, liší se použitím silentbloků o tvrdosti 65 Sh. Rozměrový náskres na obrázku č. 11.

4 MĚŘENÍ

V této kapitole jsou shrnuty podrobnosti o kompresoru a měření dle ČSN ISO 10816-8 [1]. Dále následuje vyhodnocení pro jednotlivé otáčkové režimy.

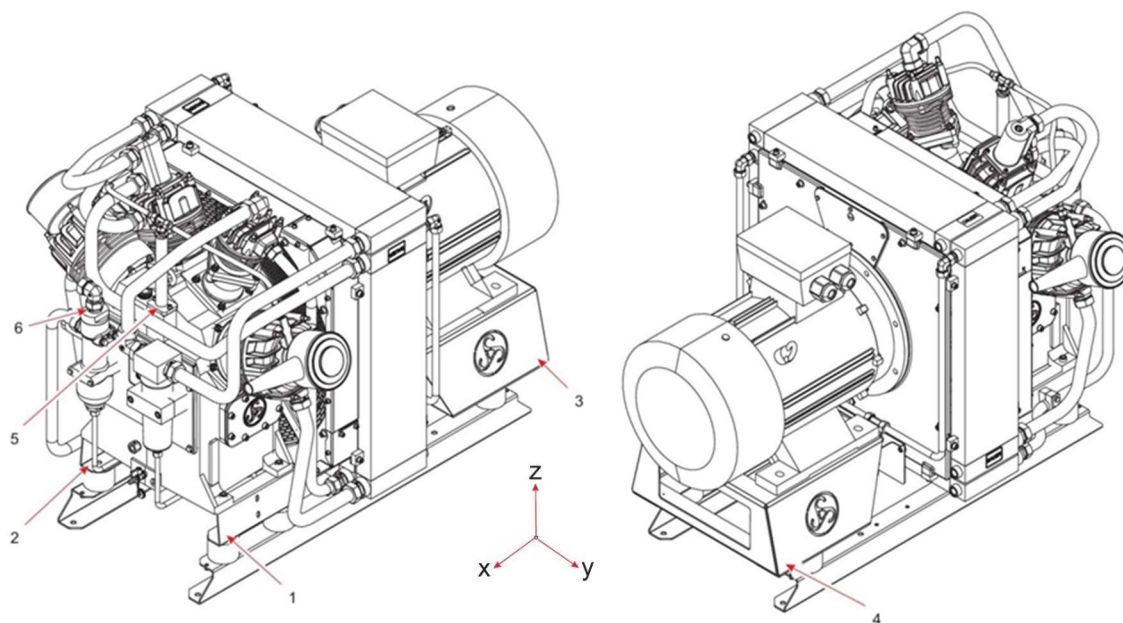
Vzhledem k množství získaných dat (pět měřících bodů ve třech osách, čtyři otáčkové režimy, tři způsoby uložení kompresoru) budou vibrace vyhodnoceny dle efektivní rychlosti. Rychlost vibrací je ukazatelem únavy ve struktuře a pro frekvence do 2 kHz je špičkám přikládána stejná váha dle skutečné energie. To se následně projeví tak, že všechny složky se promítnou do velikosti RMS stejnou měrou. Díky těmto vlastnostem je rychlost vhodným parametrem pro kvantifikaci vibrací. Dle ČSN ISO 10816-8 [1] je tzv. mohutnost vibrací RMS hodnota rychlosti vibrací mezi 10 až 1000 Hz, v mm/s.

Celkové hodnoty rychlosti vibrací jsou posuzovány spolu s analýzou ve frekvenčním spektru a časovým záznamem.

4.1 INFORMACE O MĚŘENÍ

Identifikátor kompresoru:	WP463L
Typ kompresoru:	plynový kompresor (vzduch)
Počet válců:	4
Konfigurace:	typ W
Jmenovité otáčky:	980/1180/1480/1780 ot/min
Konstantní/proměnné ot.:	konstantní
Jmenovitý výkon:	45/57/77/90 kW (30 bar)
Podpora kompresoru:	pružné uložení, volně na ploše
Hřídelová spojka:	pružná
Regulace průtoku:	40 bar do vzdušníku
Typ pohonu:	elektromotor

Datum, čas měření:	6. 1. 2017, 9 - 13 hod, Sauer Žandov
Typ přístroje:	MMF KS 76C-100, DEWESsoft Sirius, DEWESoft X2
Místo měření:	viz. obrázek 12
Jednotky měření:	mm/s
Modifikátor jednotek měření:	efektivní (RMS)
Typ měření:	časový průběh, spektrum, celková hodnota
Typ snímače:	akcelerometr
Metoda připevnění snímače:	magnet
FFT nebo jiné zpracování:	0,01 - 1 kHz, $df = 0,625$, 10/exp, Hanning
Požadavek na kalibraci:	kalibrační listy v příloze na CD



Obrázek 12 Měřící body kompresoru WP463L.

4.2 HODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření ukázalo jednoznačné výsledky pro otáčkové režimy 980 a 1180 ot/min. V těchto dvou případech jasně dominovala řešení s osmi měkkými silentbloky (8 x 40 Sh). Při daných otáčkách vibruje kompresor na nižších frekvencích a tvrdší silentbloky nejsou schopny jeho pohyb tlumit. Naměřené hodnoty to dokazují a v některých místech několikanásobně převyšují uložení s osmi měkkými silentbloky.

Vibrace kompresoru při 1480 ot/min jsou si velmi podobné při všech možnostech uložení. I přesto je doporučeno vybrat uložení s osmi měkkými silentbloky. Tato varianta prokazuje lepší tlumení v rovině YZ, která je hlavní pro vznik vibrací. Dále pak nejlépe tlumí vibrace na skříni kompresoru (měřící bod 5), vykazuje menší hodnoty špička-špička (peak-peak) a lepší průběh v časovém záznamu. Bude-li nutné použít tvrdé silentbloky, je doporučena varianta 6 x 65 Sh.

Provoz při 1780 ot/min vykazuje celkově vyšší hodnoty vibrací než v předchozích třech případech. V tomto případě se nejhůře chovají měkké silentbloky. Na základě celkových hodnot jsou uložení s tvrdými silentbloky srovnatelné. Při podrobnější analýze je u varianty se šesti silentbloky zřetelný lepší průběh v čase a menší počet harmonických frekvencí vibrací.

Všechna získaná a zpracovaná měření jsou k nalezení v příloze této bakalářské práce (CD), včetně jednotného přehledu získaných celkových hodnot. Měřící bod č. 6 nebyl měřen z důvodu prototypového uchycení odlučovače.

ZÁVĚR

Výstupem této práce je doporučení uložení nového kompresoru Sauer Compressors WP463L včetně návrhu uložení. Je-li kompresor provozován v otáčkách 980, 1180 nebo 1480 ot/min, je doporučeno použít uložení kompresoru na rámu s osmi silentbloky o tvrdosti 40 Sh. Při chodu na 1780 ot/min je doporučena varianta s šesti silentbloky o tvrdosti 65 Sh.

Srovnání s hodnotami z ČSN ISO 10816-8 [1] ukazuje, že vibrace kompresoru v pružném uložení jsou mnohonásobně vyšší, než udává norma. Porovnání s obdobným typem kompresoru WP311L, který je dlouho na trhu a vykazuje vysokou spolehlivost, má zjištěné vyšší hodnoty vibrací než WP463L. Dle tohoto je možné s vysokou jistotou předpokládat, že kompresor WP463L bude vykazovat srovnatelnou míru spolehlivosti a případné problémy nebudou souviset s vibracemi.

Tato práce zároveň slouží jako metodika měření vibrací ve firmě Sauer Žandov, a.s., umožňuje přechod z ručních vibrometrů na moderní měřicí aparaturu a techniky. Dovoluje lepší porozumění vibracím kompresorů, podrobnější analýzu (časový záznam, FFT atd.). Doplněním akcelerometrů o vysokorychlostní kameru, tlaková čidla apod. je možné přiřazení jednotlivých dějů v kompresoru ke konkrétním vibracím. Současné portfolio kompresorů bude přeměřeno dle této metodiky. Dále je doporučeno založit databázi vibrací jednotlivých typů kompresorů z vícero kusů stejného typu pro zpřesnění získaných hodnot.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČSN ISO 10816-8: *Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 8: Pístové kompresory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [2] LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. *Technika stlačeného vzduchu*. Praha: SNTL, 1988. ISBN 80-010-1947-0.
- [3] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901-9362-5.
- [4] Principy akcelerometrů: 1. díl – Piezoelektrické. *Automatizace.hw.cz* [online]. Praha: HW Server, 1997, 14.1.2007 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [5] Shannonův teorém. *Wikipedie* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001, 25. 4. 2017 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Shannonův_teorém
- [6] Universal Accelerometers. *Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.* [online]. Radebeul: Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.mmf.de/standard_accelerometers.htm
- [7] Spectral analysis using the FFT. *DEWESoft* [online]. Trbovlje, Slovenia: DEWESoft, 2000 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.dewesoft.com/pro/course/spectral-analysis-using-the-fft-29>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\vec{a}	[m/s ²]	Zrychlení
A/D	[-]	Analog – Digital
d_f	[Hz]	Rozlišení frekvenčního spektra
\vec{F}	[N]	Síla
f	[Hz]	Frekvence
FFT	[-]	Rychlá Fourierova transformace
f_{max}	[Hz]	Frekvenční rozsah
f_s	[Hz]	Snímaná frekvence
f_v	[Hz]	Vzorkovací frekvence
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
i	[-]	Imaginární jednotka
m	[kg]	Hmotnost
mV/g	[-]	Závislost napětí na zrychlení
N_s	[-]	Počet čar FFT
PC	[-]	Osobní počítač
RMS	[-]	Efektivní hodnota (Root Mean Square)
\vec{s}	[mm]	Výchylka
Sh	[Sh]	Jednotka tvrdosti dle Shore
T	[s]	Perioda
t	[s]	Čas
T_s	[s]	Doba sběru dat
USB	[-]	Univerzální sériová sběrnice
\vec{v}	[mm/s]	Rychlost
y	[m]	Okamžitá výchylka
y_m	[m]	Amplituda
φ	[rad]	Počáteční fáze
ω	[s ⁻¹]	Úhlová frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

I.	CELKOVÉ HODNOTY WP463L	29
II.	CELKOVÉ HODNOTY WP311L	30
III.	CD	31

I. CELKOVÉ HODNOTY WP463L

Originál tabulky k dispozici v příloze III. na CD.

Rychlost vibrací v mm/s rms												
Typ kompresoru: WP463L												
Sériové číslo:												
Provozní tlak: 40 bar												
Id. Nr.	ot/min	Silentbloky	1			2			3			Hodnocení
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	980	6 x 65 Sh	11,6	63,8	49,2	19,2	59,0	19,0	14,0	53,9	22,1	Průměr
2	980	8 x 40 Sh	10,4	26,6	12,8	8,7	25,7	9,9	3,8	19,9	11,6	Min
3	980	8 x 65 Sh	9,0	78,0	49,2	15,9	73,4	26,4	9,5	70,3	28,1	Max
4	1180	6 x 65 Sh	16,9	37,6	22,7	11,0	37,3	16,0	6,6	34,2	17,5	
5	1180	8 x 40 Sh	10,5	25,5	12,2	10,3	24,1	9,0	8,0	18,3	11,3	
6	1180	8 x 65 Sh	11,8	43,5	26,9	17,6	40,7	17,9	7,1	37,2	17,9	
7	1480	6 x 65 Sh	12,1	24,2	14,6	8,1	23,3	9,0	7,8	17,0	10,1	
8	1480	8 x 40 Sh	16,4	21,9	11,3	19,1	21,0	10,1	8,9	12,2	8,8	
9	1480	8 x 65 Sh	21,4	24,2	15,3	20,7	23,0	10,7	14,3	17,5	10,1	
10	1780	6 x 65 Sh	25,3	25,4	11,2	9,9	26,2	10,2	24,9	21,2	10,0	
11	1780	8 x 40 Sh	27,7	35,3	10,7	28,7	43,9	12,5	16,2	21,6	13,9	
12	1780	8 x 65 Sh	27,1	27,1	10,3	16,9	23,5	11,5	20,3	19,1	9,8	

II. CELKOVÉ HODNOTY WP311L

Originál tabulky k dispozici v příloze II. na CD.

Rychlost vibrací v mm/s rms

Typ kompresoru: **WP311**
Sériové číslo: 209 754
Provozní tlak: 40 bar

Id. Nr.	ot/min	Silentbloky	1			2			3			4			5			6			7			8			Hodnocení		
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Příměr	Min	Max
1	980	Megji 45 Sh	44,8	66,2	22,7	13,0	68,2	7,0	32,6	70,3	23,2	10,2	72,0	23,7	5,9	11,4	10,8	37,4	96,0	23,4	27,7	94,0	12,1	37,1	11,3	17,4	34,93	5,90	96,00
2	980	Megji 70 Sh	21,3	38,4	21,5	8,6	39,7	15,1	25,9	30,4	19,3	4,6	30,6	11,2	7,8	10,7	15,7	26,5	37,6	33,2	12,7	38,6	16,5	23,2	7,5	23,0	21,65	4,60	39,70
3	980	8 x 40 Sh	8,1	48,7	35,4	8,4	48,3	19,2	12,0	34,6	21,8	11,9	34,8	21,3	4,2	19,9	6,1	13,6	22,9	37,6	11,8	24,0	20,4	5,9	10,9	26,0	21,16	4,20	48,70
4	980	8 x 65 Sh	19,6	17,9	38,3	21,3	16,7	23,7	18,1	58,0	38,4	19,9	58,3	34,0	4,0	33,3	15,8	15,0	65,8	45,4	14,6	61,9	26,3	9,4	25,2	38,3	29,97	4,00	65,80
5	1180	Megji 45 Sh	36,0	35,0	44,5	27,0	32,5	48,0	26,1	62,0	24,6	17,5	62,8	29,4	8,1	21,2	5,6	31,2	80,7	52,6	23,3	79,8	53,0	22,3	23,4	7,6	35,59	5,60	80,70
6	1180	Megji 70 Sh	25,9	46,6	20,1	13,5	45,5	10,3	36,2	47,2	18,3	6,3	48,0	15,3	6,2	16,5	11,5	31,9	74,9	26,7	24,7	73,1	23,2	25,1	23,2	19,6	28,74	6,20	74,90
7	1180	8 x 40 Sh	9,0	45,3	30,6	9,1	47,3	13,6	13,5	22,3	15,3	10,5	22,6	15,8	4,8	12,0	6,5	17,2	25,3	34,4	14,3	25,5	17,5	7,5	18,6	34,6	19,71	4,80	47,30
8	1180	8 x 65 Sh	26,2	103,6	110,0	13,0	107,4	38,1	20,7	116,6	56,7	21,5	119,1	60,1	9,5	67,4	11,7	22,0	96,0	120,8	24,0	87,4	52,8	8,3	46,0	99,0	59,91	8,30	120,80
9	1480	Megji 45 Sh	22,4	72,1	78,4	18,6	68,5	46,3	22,4	118,7	43,5	16,7	121,4	52,6	6,9	56,6	5,8	26,9	114,0	9,1	19,0	10,2	74,5	18,3	50,8	65,9	47,48	5,80	121,40
10	1480	Megji 70 Sh	40,0	31,6	49,7	14,4	33,5	31,5	49,8	50,3	12,2	6,2	50,1	34,4	14,0	26,7	10,0	28,8	81,6	63,3	25,7	80,5	38,0	23,1	40,0	28,0	35,98	6,20	81,60
11	1480	8 x 40 Sh	12,0	48,0	29,5	11,9	48,2	17,1	16,1	15,1	17,2	13,0	15,2	12,9	5,1	9,9	7,8	22,0	33,6	33,7	15,1	34,4	21,8	9,4	28,8	25,2	20,96	5,10	48,20
12	1480	8 x 65 Sh	21,3	84,7	62,1	14,4	76,7	28,0	28,3	50,2	26,6	28,3	48,9	31,6	109,0	26,4	11,9	23,7	43,0	70,5	20,3	41,4	35,5	11,9	32,4	48,7	40,66	11,90	109,00
13	1780	Megji 45 Sh	18,4	93,4	68,7	12,8	96,6	26,7	26,3	73,3	32,2	20,0	76,3	37,6	11,6	29,3	9,6	31,0	55,1	79,5	33,5	56,0	39,2	16,6	29,7	60,2	43,07	9,60	96,60
14	1780	Megji 70 Sh	32,6	18,1	61,8	17,4	16,8	38,0	44,5	68,5	23,0	8,7	69,5	34,2	10,3	38,6	10,8	36,3	98,3	72,9	32,2	95,7	45,3	20,4	35,7	91,7	42,55	8,70	98,30
15	1780	8 x 40 Sh	13,8	50,7	30,7	12,1	51,3	19,0	28,5	11,2	20,5	28,3	10,9	22,1	8,1	10,1	13,3	26,8	45,9	38,8	32,8	43,9	24,7	16,0	25,0	19,8	25,18	8,10	51,30
16	1780	8 x 65 Sh	19,5	69,8	48,8	18,0	67,4	28,6	21,4	25,9	16,2	21,4	26,0	19,0	8,3	14,3	12,0	35,4	45,9	58,5	32,8	47,3	36,0	16,1	28,4	30,6	31,15	8,30	69,80

III. CD

V kapse desek je přiložené CD obsahující tabulky s celkovými hodnotami vibrací kompresorů WP463L a WP311L, všechna zpracovaná měření, kalibrační listy snímačů, technická data kompresoru WP463L ve všech otáčkových režimech a doplňující fotografie z průběhu měření.